

УДК 556.555

ИССЛЕДОВАНИЯ ЛАБОРАТОРИИ ГИДРОФИЗИКИ ИВПС КарНЦ РАН В 1991–2022 ГОДАХ

А. Ю. Тержевик, Н. И. Пальшин, Т. В. Ефремова, С. Р. Богданов,
С. Д. Голосов, И. С. Зверев, С. Ю. Волков, А. В. Митрохов,
С. И. Смирнов, Р. Э. Здоровеннов, Г. Э. Здоровеннова*

*Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН»
(пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185030),
e-mail: *zdorovennova@gmail.com*

Представлены сведения о направлениях и результатах исследований лаборатории гидрофизики ИВПС КарНЦ РАН за 1991–2022 гг. Сотрудники лаборатории изучают гидрофизические процессы и явления в разнотипных водоемах Карелии, в крупнейших водоемах Евразии – Онежском и Ладожском озерах, озере Байкал, в Белом море, а также в малых озерах Арктической зоны России. Приведены краткие сведения о практических разработках и фундаментальных научных результатах, достигнутых при выполнении государственного задания, международных и российских научных проектов, в том числе выполненных совместно с отечественными и зарубежными научными и образовательными организациями. К основным результатам можно отнести выявление закономерностей формирования термического, динамического, ледового, радиационного и кислородного режимов озер в годовом цикле (с наибольшим вниманием к периоду ледостава), разработку термической модели Онежского озера, разработку и внедрение, совместно с коллегами из Института озераведения РАН, Немецкой службы погоды и Института пресноводной экологии и рыбоводства внутренних вод (IGB, Германия), озерной модели FLake, разработку 3D-модели Вендюрского озера, изучение переноса энергии и парниковых газов в озерных экосистемах высоких широт совместно с коллегами из Хельсинкского университета, оценку адаптационных свойств водных экосистем Арктики в условиях меняющегося климата совместно с коллегами из СПбГУ (озера п-ова Ямал, дельты р. Лены, Кольского п-ова), изучение параметров турбулентности в покрытых льдом озерах в период весенней подледной конвекции, численное моделирование (Implicit LES) радиационно-генерированной конвекции совместно с коллегами из Физико-механического института Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, исследование гидрофизических процессов и явлений в заливах и бухтах Белого моря совместно с коллегами из ИВП РАН (Москва) и РГГМУ (СПб), изучение турбулентного переноса, определяющего условия роста и таяния льда в пограничном подледном слое озера Байкал совместно с коллегами из Университета Тулузы (Франция) и Лимнологического института (Иркутск).

Ключевые слова: ИВПС КарНЦ РАН; бореальные озера; термический и ледовый режимы; кислородный режим; гидродинамика; турбулентность; Белое море; Онежское озеро; численное моделирование; FLake; арктические лимносистемы

Для цитирования: Терзhevik А. Ю., Пальшин Н. И., Ефремова Т. В., Богданов С. Р., Голосов С. Д., Зверев И. С., Волков С. Ю., Митрохов А. В., Смирнов С. И., Здорovenнов Р. Э., Здорovenнова Г. Э. Исследования лаборатории гидрофизики ИВПС КарНЦ РАН в 1991–2022 годах // Труды Карельского научного центра РАН. 2023. № 6. С. 5–22. doi: 10.17076/lim1809

A. Yu. Terzhevik, N. I. Palshin, T. V. Efremova, S. R. Bogdanov, S. D. Golosov, I. S. Zverev, S. Yu. Volkov, A. V. Mitrokhov, S. I. Smirnov, R. E. Zdorovennov, G. E. Zdorovennova*. RESEARCH BY HYDROPHYSICS LABORATORY OF NWPI KarRC RAS IN 1991–2022

*Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences (50 Al. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia), *zdorovennova@gmail.com*

Information is presented on the directions and results of research at the Hydrophysics Laboratory of the Northern Water Problems Institute of the Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences in 1991–2022. Laboratory staff study hydrophysical processes and phenomena in various lakes of Karelia, in the largest lakes of Eurasia – Onego and Ladoga, in Lake Baikal, in the White Sea, as well as in small lakes of the Arctic zone of Russia. Brief information is provided on the applied developments and basic scientific results produced while implementing state-ordered assignments, international and domestic research projects, including those carried out jointly with Russian and foreign scientific and educational organizations. The main results include: identification of patterns in the formation of the thermal, hydrodynamic, ice, radiation and oxygen regimes of lakes through the annual cycle (with more focus on the ice-covered period); development of a thermal model of Lake Onego; development and implementation of FLake lake model in collaboration with colleagues from the Institute of Limnology of the Russian Academy of Sciences, German Weather Service, and the Institute for Freshwater Ecology and Inland Fisheries (IGB, Germany); development of a 3D model of Lake Vendyurskoe; investigation of energy and greenhouse gas transport in high-latitude lake ecosystems in collaboration with colleagues from the University of Helsinki; assessment of the adaptive properties of Arctic aquatic ecosystems (lakes of the Yamal Peninsula, deltas of the Lena River, Kola Peninsula) in a changing climate in collaboration with colleagues from the St. Petersburg State University; study of turbulence parameters in ice-covered lakes during the period of spring under-ice convection, numerical modeling (Implicit LES) of radiation-generated convection in collaboration with colleagues from the Physical-Mechanical Institute of the Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University; study of hydrophysical processes and phenomena in bays and inlets of the White Sea in collaboration with colleagues from the Water Problems Institute RAS (Moscow) and the Russian State Humanitarian University (St. Petersburg); study of turbulent transport, which determines the conditions for ice build-up and melting in the subglacial boundary layer of Lake Baikal in collaboration with colleagues from the University of Toulouse, France, and the Limnological Institute in Irkutsk.

Keywords: NWPI KarRC RAS; boreal lakes; thermal and ice regimes; oxygen regime; hydrodynamics; turbulence; White Sea; Lake Onego; numerical modeling; FLake; Arctic limnic systems

For citation: Terzhevik A. Yu., Pal'shin N. I., Efremova T. V., Bogdanov S. R., Golosov S. D., Zverev I. S., Volkov S. Yu., Mitrokhov A. V., Smirnov S. I., Zdorovennov R. E., Zdorovennova G. E. Research by Hydrophysics Laboratory of NWPI KarRC RAS in 1991–2022. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2023. No. 6. P. 5–22. doi: 10.17076/lim1809

Введение

Для того чтобы охарактеризовать деятельность лаборатории гидрофизики Института водных проблем Севера Карельского научного центра РАН (ИВПС) за последние тридцать лет,

необходимо сказать несколько слов о специфике этого периода. Десятилетие с 1991 по 2000 г. было наиболее тяжелым и для Карельского научного центра, и в целом для российской науки: отсутствие устойчивого государственного финансирования научных исследований и ощущения

перспективы, низкие доходы сотрудников привели к уходу из многих институтов наиболее активных и квалифицированных специалистов. В результате большинство научных учреждений страны перешли в состояние «анабиоза». Небольшое число институтов, в их числе ИВПС, использовали любую возможность сохранить рабочее состояние коллектива. Хоздоговорные работы и двусторонние международные соглашения были в то время основными рабочими инструментами. Все гидрофизические исследования ИВПС до образования лаборатории гидрофизики в 2002 г. проводились лабораторией гидрологии, заведующим которой в 1988–1999 гг. был П. М. Бояринов (рис. 1).

Особое внимание на протяжении многих лет исследований уделялось термическому и гидродинамическому режимам Онежского озера. На основе анализа данных наблюдений было установлено [Бояринов, Петров, 1991], что большое влияние на динамику вод озера оказывают сезонные фронтальные зоны: в период весеннего нагревания и осеннего охлаждения – термический бар, при установившейся термической стратификации летом – апвеллинги, в устьях рек – стоковые фронты. Впервые рассмотрена роль свободной проникающей конвекции в перемешивании водных масс в период весеннего подледного прогрева и в суточном цикле теплообмена в системе «озеро–атмосфера». Детальные исследования

баротропных сейш и внутренних волн [Бояринов, Петров, 1991] показали их роль в пространственно-временной изменчивости полей температуры в озере. Для расчетов плотности пресной воды как двухкомпонентной системы (вода – растворенные соли с постоянным соотношением главных ионов) были предложены дополнительные поправки, позволяющие учитывать химический состав воды [Пальшин, 1999].

К началу 1994 года между ИВПС и Департаментом инженерии водных ресурсов Лундского университета (Швеция) была достигнута договоренность о проведении пилотного проекта исследований гидрофизических процессов в подледный период в небольшом озере Вендюрское, расположенном на юге Карелии. Вкладом с российской стороны являлись опыт сотрудников в проведении подобных работ и приборная база, превосходившая технические возможности наших шведских коллег. Рабочие моменты тех лет показаны на рис. 2. Работы проводились 18 марта – 7 апреля 1994 г. на оз. Вендюрском на шести разрезах (рис. 3, а). Помимо площадных съемок были установлены две термокосы; также проводились измерения течений на отдельных станциях и горизонтах в столбе воды. Подробное описание работ, использовавшейся аппаратуры и полученные результаты приведены в [Bengtsson et al., 1996; Malm et al., 1996, 1998]. Эти исследования положили начало углубленному изучению

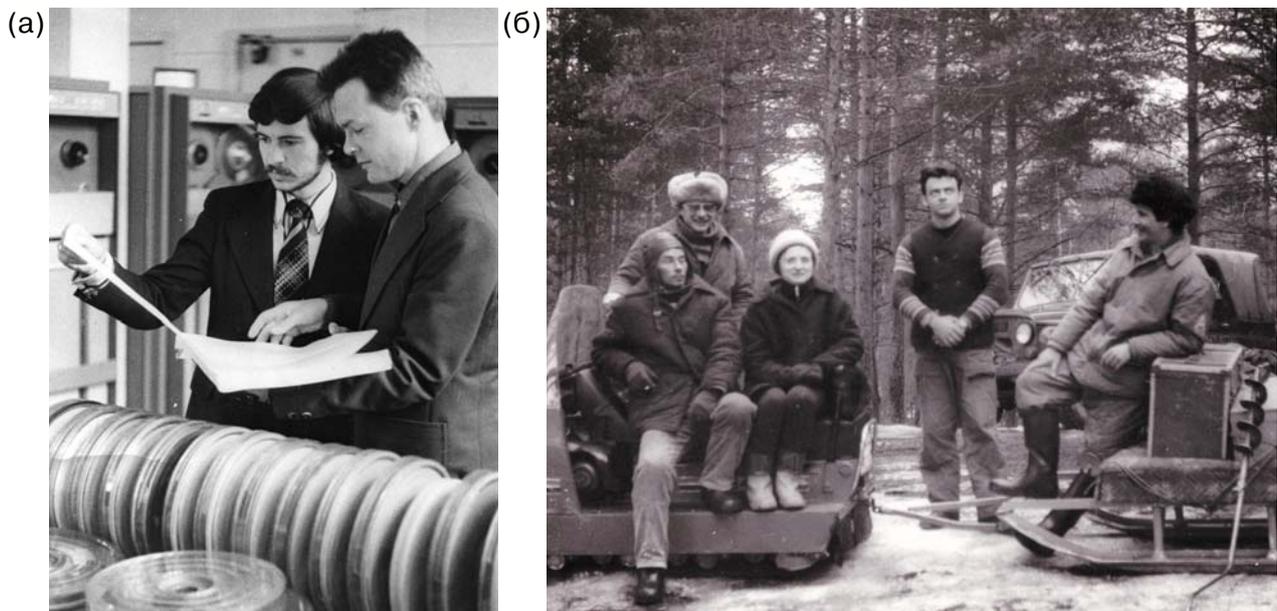


Рис. 1. (а) П. М. Бояринов (слева) и П. Т. Хайми в лаборатории вычислительной техники; (б) слева направо: Б. М. Зобков, М. П. Петров, Т. В. Ефремова, С. Ф. Руднев, П. М. Бояринов на оз. Сямозеро, март 1986 г.

Fig. 1. Left photo: P. M. Boyarinov (left) and P. T. Hymie in the computer lab. Right photo: from left to right B. M. Zobkov, M. P. Petrov, T. V. Efremova, S. F. Rudnev, P. M. Boyarinov on Lake Syamozero, March, 1986

подледного периода на малых озерах, которое продолжается по сегодняшний день.

Следует сразу отметить, что с самого начала принципиальным отличием наших работ на оз. Вендюрском от всех известных на тот момент лимнологических исследований малых озер были систематические наблюдения на большой сетке станций с регистрацией всех параметров, необходимых для различных оценок, и в первую очередь – потоков тепла на границах сред [Mironov et al., 2002; Голосов и др., 2017].

С 1994 по 2006 год основное внимание уделялось периоду ледостава: ежегодно с октября по май в озере находились 1–3 автономные косы, фиксировавшие температуру с шагом по времени 1–3 ч датчиками, распределенными по водному столбу через 0,5–1,5 м [Петров и др., 2006].

В течение четырех зимних сезонов в озере устанавливалась так называемая «тройная» коса, включающая дополнительные датчики во льду и в верхнем слое донных отложений (до глубины 1,4 м). В 1994–1996 годах выполнялось



Рис. 2. (а) Полевые работы в марте-апреле 1994 г. на озере Вендюрском. Слева направо: А. Ю. Тержевик, А. В. Митрохов, П. М. Бояринов, Й. Мальм; (б) рабочее совещание в рамках совместного проекта с Лундским университетом на НИС «Эколог», Онежское озеро. Слева направо: А. М. Глинский, М. П. Петров, Л. Йонссон, Й. Мальм, А. Ю. Тержевик

Fig. 2. Upper photo: field work in March-April, 1994 on Lake Vendyurskoe, from left to right A. Yu. Terzhevik, A. V. Mitrokhov, P. M. Boyarinov, J. Malm. Lower photo: working meeting within the framework of a joint project with Lund University on the R/V 'Ecolog', Lake Onego, from left to right A. M. Glinsky, M. P. Petrov, L. Jonsson, J. Malm, A. Yu. Terzhevik

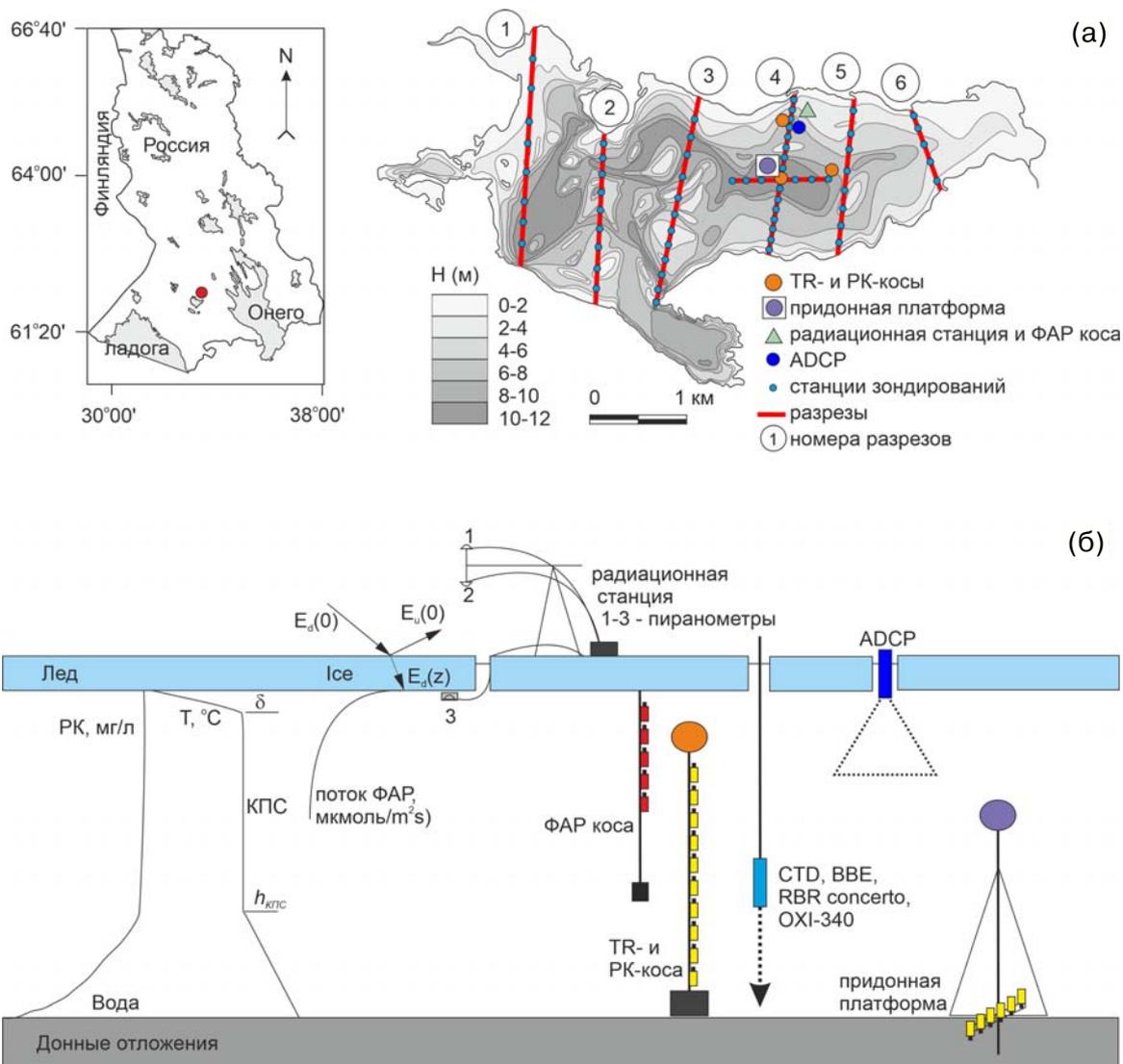


Рис. 3. (а) Положение оз. Вендюрское на карте Карелии (красная точка), батиметрия озера, положение разрезов и станций измерений; (б) схема расположения приборов в воде и на льду, схематичное распределение по вертикали температуры, растворенного кислорода и потоков ФАР в период весенней подледной конвекции

Fig. 3. (a) Location of Lake Vendyurskoe on the map of Karelia (red dot), bathymetry of the lake, location of transects and measurement stations, (b) schematic layout of devices in water and on ice, and a schematic vertical distribution of temperature, dissolved oxygen and PAR fluxes during the period of spring under-ice convection

3–4 сезонных зимних съемки на 55 станциях 6 поперечных разрезов (рис. 3, а), в последующие годы количество разрезов сократилось до двух – продольного и поперечного, а количество станций до 22.

На разрезах проводились измерения: температуры и электропроводности воды от уреза воды до дна, а также вблизи границ вода-лед и вода-дно; содержания растворенного кислорода (ПК) (с 2000 г.); температурного градиента в верхнем 10-см слое донных отложений (ДО); толщины и структуры снежно-ледового покро-

ва и уровня воды в лунке; суммарной, отраженной, а также проникающей под лед солнечной радиации (на радиационной станции); течений, а также горизонтальных и вертикальных смещений льда.

Для измерения температуры на автономных буйковых станциях использовались термоксы TR-1, при вертикальных зондированиях – RCM-4 (оба прибора производства норвежской фирмы Aanderaa Instruments) и TCD-зонд, разработанный в ИВПС КарНЦ РАН. Поскольку накопители данных были ограниченной

емкости, сигнал регистрировался с шагом 1–3 часа. Для измерения течений применялись высокочувствительные приборы: акустический измеритель течений АСМ, разработанный НПО «Экран», и волосковый измеритель течений DWCM, разработанный в ИВПС КарНЦ РАН А. М. Глинским [Glinsky, 1998]. Измерения прямой, отраженной и подледной радиации проводились с помощью пиранометров «Star-shaped pyranometer» фирмы «Theodor Friderich & Co, Meteorologische Gerate und Systeme» (рис. 4, а), а также прибора, сконструированного на базе универсального отечественного пиранометра М-80М. Оценки альbedo снежно-ледового покрова выполнялись с использованием универсального пиранометра М-80М и цифрового милливольтметра. Определение концентраций РК (с 2000 г.) производилось с использованием прибора Oxi340 WTW (Германия) (рис. 4, б).

С 2007 г. приборный парк ИВПС начал наполняться современным оборудованием, что существенно расширило диапазон измерений и список исследуемых процессов. От наблюдений за изменениями в пределах сезона (зима, весна) мы смогли перейти к круглогодичным исследованиям, появилась возможность изучения годовой и межгодовой динамики наблюдаемых параметров, а также, за счет высокой точности приборов, мезо- и мелкомасштабных процессов.

В центральной глубоководной части оз. Вендюрского (рис. 3, а) с июля 2007 г. до настоящего времени (за исключением периода с октября 2013 г. по октябрь 2014 г.) в круглогодичном режиме находится коса, оснащенная высокоточными датчиками температуры, растворенного кислорода и давления RBR Ltd. (точность по температуре 0,001 °С, диапазон по кислороду 0–150 %, точность 1 %, диапазон по давлению 0–20, 0–50, 0–200 м). В 2007–2013 гг. дополнительно устанавливались еще две косы с такими же датчиками – над локальным углублением вблизи северного берега озера и на восточном склоне (рис. 3, а). Датчики на косах распределены по водному столбу через 0,02–1,5 м с наибольшей дискретностью в придонном слое. В июне и октябре автономная станция извлекается из озера для замены батарей, калибровки датчиков и снятия данных, затем возвращается в озеро. Интервал измерений – одна минута.

На расстоянии ~ 50 м от центральной косы в 2007–2020 гг. устанавливалась придонная платформа, оснащенная 10 датчиками температуры и давления RBR, распределенными таким образом, что часть из них попадают в верхний слой донных отложений, часть – оста-

ются в придонной воде. Сдвиг между датчиками составляет 2 см, что позволяет с высокой точностью вычислять величину теплопотока на границе вода-дно и изучать его изменение в годовом цикле. Конструкция придонной платформы за годы измерений несколько раз менялась [Гавриленко и др., 2015]. За основу первого варианта была принята придонная платформа, разработанная в IGB (Германия) при активном участии Г. Б. Кириллина [Kirillin et al., 2009]. В настоящее время используется модель платформы, фото которой приведены на рис. 5. На эту модификацию придонной платформы получено свидетельство о государственной регистрации полезной модели, авторы – А. В. Митрохов и Н. И. Пальшин [2015].

Начиная с октября 2007 г. до настоящего времени на озере ежегодно проводятся сезонные съемки в апреле (период весеннего таяния и развития подледной конвекции), июне (весенне-летнее нагревание, установление стратификации) и октябре (осеннее охлаждение, гомотермия). Измерения проводятся на 22 станциях продольного и поперечного разрезов (рис. 3, а) в режиме вертикального зондирования водной толщи зондами STD-48, STD-90, RBR-Concerto, VBE Moldaenke. Измеряемые параметры – температура воды, электропроводность, мутность, РК, хлорофилл *a*, поток фотосинтетической радиации (ФАР). С весны 2007 г. при проведении сезонных съемок в озеро устанавливается коса, оснащенная датчиками ФАР, распределенными до глубин 2,5–7,0 м.

С июня 2015 г. в распоряжении лаборатории появились два высокоточных прибора – акустические доплеровские измерители течений Aquadopp Nortek Profiler HR, с помощью которых проводится изучение параметров турбулентности конвективного слоя покрытых льдом озер. Начиная с 2021 г. в рамках выполнения проекта РНФ 21-17-00262 «Перемешивание в бореальных озерах: механизмы и их эффективность» совместно с сотрудниками Высшей школы прикладной математики и вычислительной физики Физико-механического института Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого проводится численный расчет параметров турбулентности конвективно-перемешанного слоя покрытого льдом озера в период развития весенней подледной конвекции.

Наряду с ежегодными исследованиями на оз. Вендюрском сотрудники лаборатории гидрофизики совместно с коллегами из других лабораторий ИВПС КарНЦ РАН принимают активное участие в исследованиях и других водоемов. С использованием обширного парка современного оборудования измерения про-

водятся на разнотипных водоемах Карелии, на Онежском и Ладожском озерах (рис. 6), озере Байкал совместно с коллегами из Университета Тулузы (Франция) и Лимнологического института (Иркутск), на Белом море – с ИВП РАН (Москва) и РГГМУ (СПб), ряде водоемов Арктической зоны – в дельте р. Лены, п-ове Ямал, Кольском п-ове совместно с коллегами из СПбГУ, АНИИ, Казанского и Сибирского федеральных университетов.

Основные результаты исследований лаборатории гидрофизики ИВПС КарНЦ РАН за прошедшие 30 лет

Термический, ледовый и кислородный режимы озер

Анализ данных многолетних измерений температуры и течений в период ледостава в оз. Вендюрском позволил установить, что в



Рис. 4. (а) Измерение потоков радиации на поверхности Онежского озера; (б) измерение содержания растворенного кислорода в надилловой воде Н. И. Пальшиным, оз. Вендюрское

Fig. 4. (a) Measurements of solar radiation fluxes on the surface of Onego Lake; (б) measuring dissolved oxygen content in the above silt water by N. I. Palshin, Lake Vendyurskoe

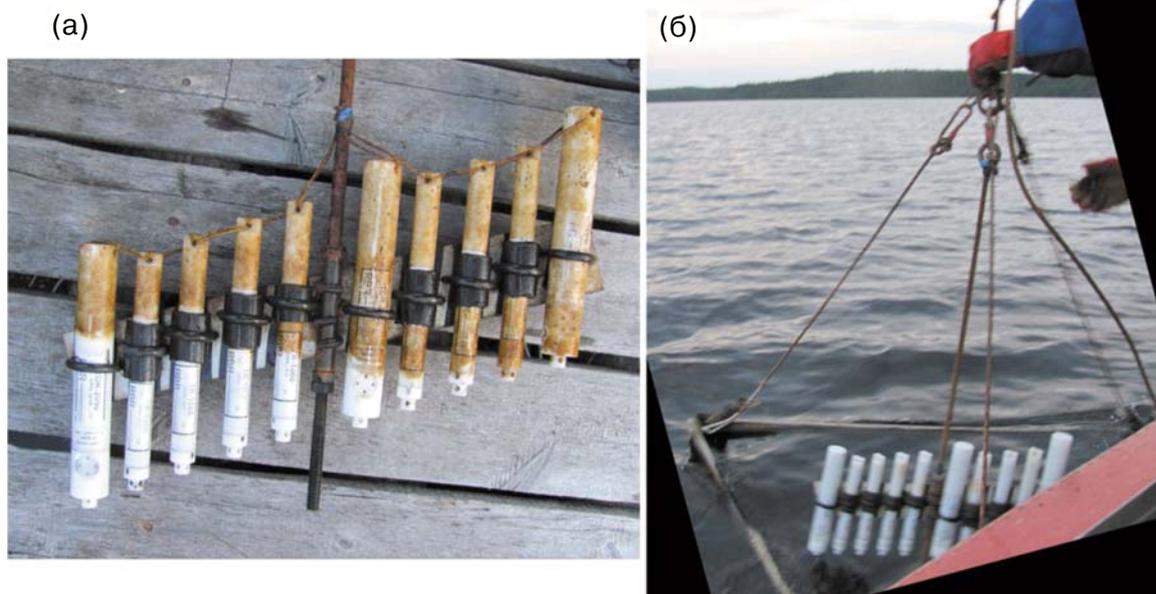


Рис. 5. Придонная платформа: (а) после извлечения из озера 15 июня 2016 г.; (б) постановка в озеро 17 июня 2016 г.

Fig. 5. Bottom platform: (a) after being removed from the lake on June 15, 2016, (б) placing in the lake on June 17, 2016

озере зимой практически постоянно наблюдаются квазипериодические колебания температуры воды и скорости, по времени близкие к теоретическому периоду баротропной сейши [Петров и др., 2007; Здоровеннов и др., 2011]. Исследования показали, что эти колебания могут выступать в роли резонатора для формирования коротких внутренних волн [Palshin et al., 2018; Volkov et al., 2020; Bogdanov et al., 2023b].

В мелководных озерах зимой динамика РК определяется биохимическими процессами [Golosov et al., 2007; Тержевик и др., 2010; Zdorovenнова et al., 2021]. Отсутствие света и активность бактерий в придонных слоях приводят к резкому снижению в них РК, вплоть до аноксии. Установлено, что поздний ледостав приводит к существенным потерям тепла в озере и донных отложениях и более длительной аэрации водоема. В результате вода в придонных слоях после установления льда прогревается слабее и вероятность образования аноксии уменьшается из-за снижения активности бактерий, потребляющих кислород при разложении органики [Terzhevik et al., 2009; Тержевик и др., 2010]. Летом при усилении стратификации создаются благоприятные условия для формирования острого кислородного дефицита в придонных слоях [Ефремова и др., 2015; Тержевик и др., 2017]. Результаты моделирования показывают, что потепление климата увеличивает риск возникновения глубоководной анок-

сии в мелких мезотрофных водоемах, расположенных в зоне умеренных широт [Golosov et al., 2012].

По данным инструментальных наблюдений на сети станций и постов Северо-Западного межрегионального территориального управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды Росгидромета за многолетний период (1936–1989 гг.) выявлены особенности термического и ледового режимов более 70 разнотипных озер Карелии. Получены регрессионные уравнения, позволяющие вычислять температуру поверхности озер в период открытой воды, сроки «биологического лета», вертикальное распределение температуры воды в период максимального прогрева летом и в период ледостава, а также сроки ледовых явлений для различных типов водоемов в зависимости от географических факторов [Озера..., 2013; Ефремова и др., 2016; Пальшин, Ефремова, 2017]. Анализ ледовой фенологии в 1950–2009 гг. показал смещение сроков замерзания озер к более поздним, а сроков очищения ото льда – к более ранним датам по сравнению со среднемноголетними значениями. Продолжительность периода ледостава на озерах сократилась в среднем на 11–16 суток, а для Онежского озера и Сегозера – более чем на 20 суток по сравнению со средними значениями за весь 60-летний период [Efremova et al., 2013].



Рис. 6. Измерение гидрофизических параметров с борта НИС «Эколог». Слева направо: Р. Э. Здоровеннов, А. В. Митрохов

Fig. 6. Measuring hydrophysical parameters from the R/V 'Ecolog'. From left to right: R. E. Zdrovennov, A. V. Mitrokhov

Радиационный режим озер

На основе анализа данных многолетних актинометрических наблюдений показана значительная временная (межгодовая, сезонная, синоптическая, суточная) и пространственная изменчивость альbedo снежно-ледяного покрова оз. Вендюрского. Установлены диапазоны альbedo снега и льда для широкого спектра состояния поверхности и погодных условий [Петров и др., 2005]. Разработан метод параметризации альbedo поверхности озера в период весеннего таяния, основанный на использовании в качестве предиктора аккумулированного внешнего потока тепла, определяющего скорость таяния снега, белого и кристаллического льда и, следовательно, изменчивость альbedo во времени [Zdrovennova et al., 2018]. В результате серии натурных экспериментов определены эффективные коэффициенты поглощения солнечной радиации снегом и льдом. Сравнение наблюдаемых и расчетных значений подледной радиации показало, что найденные коэффициенты адекватно описывают поглощение солнечной радиации снежно-ледовым покровом [Петров и др., 2005].

Процессы переноса и перемешивания в озерах

По результатам многолетних натурных измерений исследовано влияние гидрофизиче-

ских факторов на распределение клеток водорослей по водному столбу в период открытой воды [Здоровеннов и др., 2021] и ледостава [Пальшин и др., 2019]. Для периода открытой воды показано, что, когда водная толща озера находится в состоянии гомотермии, хлорофилл *a* равномерно распределен по водному столбу. При усилении термической стратификации максимальные концентрации хлорофилла *a* приурочены к поверхностному перемешанному слою, ниже слоя скачка температуры они резко снижаются. Для периода весенней подледной конвекции получено прогностическое уравнение, отражающее обратную зависимость коэффициентов вариации концентрации хлорофилла *a* в конвективном слое от потоков солнечной радиации, проникающей под лед; показана связь между увеличением концентрации хлорофилла в конвективном слое и толщиной слоя [Пальшин и др., 2019].

По данным многолетних измерений изучены процессы переноса и перемешивания при развитии весенней подледной радиационно-генерированной конвекции в покрытых льдом озерах [Mironov et al., 2002; Kirillin, Terzhevnik, 2011; Kirillin et al., 2012; Zdrovennova et al., 2021; Bogdanov et al., 2023a]. В рамках международного междисциплинарного проекта «Life under ice» (2015–2017 гг.), направленного на изучение функционирования биоты озер в период ледостава в меняющихся климатических усло-

виях, проведены уникальные эксперименты по одновременному измерению температуры и электропроводности воды, потоков солнечной радиации в водной толще, течений, концентраций хлорофилла *a* и РК [Bouffard et al., 2019]. Получены новые представления о пространственной структуре конвективного слоя как о системе упорядоченных конвективных ячеек, оценены их размеры и скорость перемещения. Установлено, что, несмотря на низкие скорости течений, гидродинамический режим конвективного слоя близок к режиму полностью развитой турбулентности [Volkov et al., 2018; Bogdanov et al., 2019; Волков и др., 2019].

В рамках проекта РНФ 21-17-00262 «Перемешивание в бореальных озерах: механизмы и их эффективность», поддержанного в 2021 г., разработаны методы расчета турбулентных напряжений, основанные на использовании данных одного или двух трехлучевых акустических доплеровских профилографов скорости. Эти методы позволяют рассчитывать не только интенсивности пульсаций вдоль трех ортогональных осей, но и недиагональные компоненты тензора Рейнольдса. С использованием условия однородности средней скорости по горизонтали рассчитана анизотропия турбулентных пульсаций, изучена корреляция энергии турбулентности с интенсивностью накачки (через поток плавучести). Приведен качественный анализ параметров и динамики энергосодержащих структур, развивающихся в конвективном слое небольших покрытых льдом озер весной [Bogdanov et al., 2021a, b].

Термическая модель Онежского озера

С использованием данных измерений температуры воды на рейдовых вертикалях Онежского озера Карельского республиканского центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды за период с 1958 по 1989 г. и натурных данных ИВПС были получены среднемноголетние характеристики распределения температуры воды. Для вычисления среднемноголетнего хода температуры воды на различных горизонтах использовалась непрерывная временная аппроксимирующая параметрическая функция, которая позволяет получать ежедневные средние значения температуры воды на стандартных горизонтах в различных районах Онежского озера [Бояринов и др., 1999]. По полученным модельным кривым построены ежемесячные карты-схемы распределения температуры воды с 1 июня по 1 ноября на различных горизонтах, распределение температуры воды на вертикальных разрезах [Онежское..., 2010]. Впервые

были установлены среднемноголетние пространственные распределения полей температуры воды в Онежском озере на любую дату для периода открытой воды. Они позволили выявить характерные особенности в формировании температурного режима в различных районах озера на разных горизонтах, количественно оценить интенсивность нагрева и охлаждения отдельных слоев, определить сроки максимального прогревания различных горизонтов, время прохождения термического бара, сроки наступления «биологического лета».

Численное моделирование термогидродинамических процессов в мелководном озере

Коллективом исследователей, в который входили сотрудники лаборатории гидрофизики ИВПС КарНЦ РАН, Института озероведения РАН, Немецкой службы погоды и Института пресноводной экологии и рыбоводства внутренних вод (IGB, Германия), разработана и внедрена в широкое пользование новая озерная модель FLake [Mironov et al., 2010; Kirillin et al., 2011; Golosov et al., 2018]. Эта модель была включена для тестирования в систему численного прогноза погоды для ограниченной территории Немецкой службы погоды, а также в коды региональных климатических моделей CLM (GKSS Research Center, Geesthaht, Германия) и RCA (SMHI, Norrköping, Швеция). На сегодняшний день модель используется в качестве озерного модуля практически во всех европейских консорциумах численного прогноза погоды, включая Россию, и широко применяется в исследованиях озер на региональном и глобальном уровне [Woolway, Merchant, 2019].

Трехмерная математическая модель гидротермодинамики внутреннего моря (МГВМ), разработанная в Институте вычислительной математики РАН и в Институте океанологии им. П. П. Ширшова РАН [Ибраев, 2008], адаптирована для пресноводных озер. Для оз. Вендюрского построена сеточная область по данным подробной эхолокационной съемки. Модель верифицирована по данным измерений температуры на оз. Вендюрском в зимний период. Проведен расчет термогидродинамических полей в озере в период открытой воды при меняющемся атмосферном воздействии [Зверев и др., 2020].

Численный расчет подледной радиационно-генерированной конвекции проведен в рамках проекта РНФ 21-17-00262, для расчетов использовался конечно-объемный программный код SINF/Flag-S, разработанный в СПбПУ [Смирнов, Зайцев, 2004]. В работе применялся

алгоритм SIMPLEC со вторым порядком точности по времени. Дискретизация конвективных слагаемых выполнена с использованием схемы QUICK (номинально третьего порядка точности). Диффузионные слагаемые аппроксимировались по центрально-разностной схеме второго порядка точности. В расчетах использовался метод Implicit LES (ILES), в котором не вводится подсеточная турбулентная вязкость, а роль физической вязкости на подсеточных масштабах заменяется диссипативными свойствами соответствующей численной схемы. Модельные поля температуры и скорости при периодической внешней накачке энергии хорошо воспроизводят особенности изменения этих параметров в покрытых льдом озерах в период весеннего подледного нагревания [Smirnov et al., 2022; Bogdanov et al., 2023a].

Участие в исследованиях Белого моря

Сотрудники лаборатории гидрофизики ИВПС КарНЦ РАН принимали активное участие в многолетних экспедиционных исследованиях, направленных на изучение гидрофизических процессов в заливах и бухтах Белого моря, а также в эстуарных зонах впадающих в море рек, совместно с коллегами из других лабораторий ИВПС, а также с учеными ИВП РАН (Москва) и РГГМУ (СПб). Результаты этих исследований отражены в ряде публикаций в ведущих отечественных и зарубежных изданиях [White..., 2005; Долотов и др., 2005, 2008; Белое..., 2007; Радченко и др., 2019].

Участие в исследованиях на озере Байкал

Сотрудники лаборатории гидрофизики ИВПС принимали участие в исследованиях гидрофизических процессов в озере Байкал в период ледостава. В рамках совместных экспедиционных работ с коллегами из Франции (Университет Тулузы), IGB (Германия, Берлин) и Лимнологического института (Россия, Иркутск) исследовался интереснейший феномен появления колец на льду больших озер [Kougaev et al., 2019], проводилось изучение турбулентного переноса, определяющего условия роста и таяния льда в пограничном подледном слое [Kirillin et al., 2020].

Участие в экспедиционных исследованиях водоемов Арктической зоны

Сотрудники лаборатории гидрофизики ИВПС, совместно с учеными из СПбГУ, АНИИ, Казанского и Сибирского федеральных университетов, в рамках проектов РФФИ «Эмерджентность

прибрежных арктических водных экосистем как результат изменения палеоэкологических и современных воздействий» (2014–2016 гг.) и РФФИ_Арктика «Адаптация арктических лимносистем к быстрому изменению климата» (2018–2020 гг., рук. И. В. Федорова, СПбГУ) проводили экспедиционные исследования, направленные на оценку состояния и изменений водных экосистем Арктики, их адаптационных свойств в условиях меняющегося климата. Исследования проводились на озерах п-ова Ямал, дельты р. Лены, Кольского п-ова. В рамках проекта проводился анализ многолетних данных о параметрах меняющейся окружающей среды, разрабатывались новые индикаторы для оценки изменения водных экосистем, обосновывался прогноз их дальнейшего развития [Здоровеннова и др., 2016; Zdorovenov et al., 2020; Fedorova et al., 2021; Weyhenmeyer et al., 2022].

Международное сотрудничество

В течение многих лет происходило международное сотрудничество лаборатории гидрофизики с Лундским университетом (Швеция), Университетом Хельсинки (Финляндия), Немецкой службой погоды (Германия), Лейбниц-Институтом пресноводной экологии и внутреннего рыболовства (Германия). Выполнен ряд проектов, поддержанных Европейской комиссией, ИНТАС, РФФИ и другими научными фондами. Вот некоторые из этих проектов: «The Thermal Structure and Circulation Patterns in Ice-Covered Lakes: Measurements and Modelling» (INTAS-97-0734, 1998–2000); «Representation of Lakes in Numerical Models for Environmental Applications» (INTAS-01-2132, 2002–2004); «Lake model FLake: An advanced tool for environmental modeling and education» (INTAS-05-100007-431, 2004–2006); «Тепло- и массоперенос в озерах подо льдом» (РФФИ № 10-05-91331-ННИО_а, 2010–2012); «Цикл углерода в системе озеро-атмосфера: наблюдения и моделирование / Роль физических процессов в динамике метана в мелководных бореальных озерах» (РФФИ, № 14-05-91761-АФ_а, 2014–2016), «Towards a comprehensive understanding of transport of energy and greenhouse gases in lacustrine ecosystems (GHG-LAKE)» (7-я рамочная программа, международная схема по обмену исследователями, номер гранта PIRSES-GA-2013-612642, 2015–2018).

Востребованность результатов

В базе данных РИНЦ зарегистрировано 290 статей сотрудников лаборатории гидро-

физики (в ядре РИНЦ – 103); суммарное число цитирований 2998 (в ядре РИНЦ ~ 1761), индекс Хирша (ИХ) – 33 (в ядре РИНЦ – 22). В базах данных Web of Sciences и Scopus зарегистрировано 105 статей; суммарное число цитирований > 1000; ИХ – 15; год начала роста цитирований – 2009. Можно отметить, что обзор гидрофизических исследований в озерах, покрытых льдом [Kirillin et al., 2012], подготовленный с участием сотрудников лаборатории, оказался востребован научным сообществом: на сегодняшний день зарегистрировано 239 цитирований этой публикации в базе данных РИНЦ и 352 в базах Web of Sciences и Scopus.

Литература

- Белое море и его водосбор под влиянием климатических и антропогенных факторов / Ред. Н. Н. Филатов, А. Ю. Тержевик. Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 2007. 335 с.
- Бояринов П. М., Ефремова Т. В., Пальшин Н. И., Петров М. П., Филатов Н. Н. Термика и динамика вод озера // Онежское озеро. Экологические проблемы. Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 1999. С. 22–48.
- Бояринов П. М., Петров М. П. Процессы формирования термического режима глубоких пресноводных водоемов. Л.: Наука, 1991. 174 с.
- Волков С. Ю., Богданов С. Р., Здоровеннова Г. Э., Здоровеннов Р. Э., Пальшин Н. И., Тержевик А. Ю. Крупномасштабная структура конвективного перемешанного слоя в мелководном озере подо льдом // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2019. Т. 12, № 1. С. 30–39. doi: 10.7868/S2073667319010040
- Гавриленко Г. Г., Здоровеннова Г. Э., Здоровеннов Р. Э., Пальшин Н. И., Митрохов А. В., Тержевик А. Ю. Теплопоток на границе вода-донные отложения в небольшом озере // Труды Карельского научного центра РАН. 2015. № 9. С. 3–9. doi: 10.17076/lim72
- Голосов С. Д., Зверев И. С., Тержевик А. Ю. Вертикальная термическая структура и теплообмен в озере в период ледостава // Труды Карельского научного центра РАН. 2017. № 3. С. 13–20. doi: 10.17076/lim464
- Долотов Ю. С., Филатов Н. Н., Шевченко В. П., Немова Н. Н., Римский-Корсаков Н. А., Денисенко Н. В., Кутчева И. П., Бояринов П. М., Петров М. П., Лифшиц В. Х., Платонов А. В., Демина Л. Л., Кухарев В. И., Коваленко В. Н., Здоровеннов Р. Э., Ратькова Т. Н., Сергеева О. М., Новигатский А. Н., Паутова Л. А., Филиппова К. В., Нюттик Е.-М., Лоренцен Х. Мониторинг приливно-отливных обстановок в эстуариях Карельского побережья Белого моря // Водные ресурсы. 2005. Т. 32, № 6. С. 670–688.
- Долотов Ю. С., Филатов Н. Н., Шевченко В. П., Петров М. П., Толстиков А. В., Здоровеннов Р. Э., Платонов А. В., Филиппов А. С., Бушуев К. Л., Кутчева И. П., Денисенко Н. В., Штайн Р., Заукель К. Комплексные исследования в Онежском заливе Белого моря и эстуарии реки Онега в летний период // Океанология. 2008. Т. 48, № 2. С. 276–289.
- Ефремова Т. В., Пальшин Н. И., Здоровеннова Г. Э., Тержевик А. Ю. Влияние экстремально жаркого лета 2010 г. на температуру воды и распределение кислорода в озерах Карелии // Метеорология и гидрология. 2015. № 9. С. 67–75.
- Ефремова Т. В., Пальшин Н. И., Белашев Б. З. Температура воды разнотипных озер Карелии в условиях изменения климата (по данным инструментальных измерений 1953–2011 гг.) // Водные ресурсы. 2016. Т. 43, № 2. С. 228–238. doi: 10.7868/S0321059616020024
- Зверев И. С., Здоровеннов Р. Э., Здоровеннова Г. Э., Пальшин Н. И., Богданов С. Р., Гавриленко Г. Г., Волков С. Ю., Ефремова Т. В., Голосов С. Д., Тержевик А. Ю. Реакция мелководного озера на ветровую нагрузку в период открытой воды (по данным численных экспериментов на 3D-модели) // Труды Карельского научного центра РАН. 2020. № 9. С. 5–17. doi: 10.17076/lim1297
- Здоровеннов Р. Э., Здоровеннова Г. Э., Пальшин Н. И., Тержевик А. Ю. Изменчивость термического и кислородного режимов мелководного озера зимой // Труды Карельского научного центра РАН. 2011. № 4. С. 57–63.
- Здоровеннов Р. Э., Ефремова Т. В., Пальшин Н. И., Здоровеннова Г. Э. Роль термогидрофизических процессов в распределении хлорофилла «а» в водной толще малого мезотрофного озера // Известия РГО. 2021. № 3. С. 47–62. doi: 10.31857/S0869607121030083
- Здоровеннова Г. Э., Шадрина А. А., Федорова И. В. Моделирование термического режима малых арктических озер // Успехи современного естествознания. 2016. № 1. С. 111–115.
- Ибраев Р. А. Математическое моделирование термогидродинамических процессов в Каспийском море. М.: Геос, 2008. 127 с.
- Митрохов А. В., Пальшин Н. И. Автономное устройство для измерения профиля температуры в придонных слоях воды и грунта. Патент на полезную модель RU 153787 U1, 27.07.2015. Заявка № 2014146400/28 от 18.11.2014.
- Озера Карелии. Справочник / Ред. Н. Н. Филатов, В. И. Кухарев. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2013. 464 с.
- Онежское озеро. Атлас / Отв. ред. Н. Н. Филатов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2010. 151 с.
- Пальшин Н. И. Термические и гидродинамические процессы в озерах в период ледостава. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1999. 86 с.
- Пальшин Н. И., Ефремова Т. В. Термическая структура озер Северо-Запада России в период ледостава // География и природные ресурсы. 2017. № 2. С. 100–106. doi: 10.21782/GIPRO206-1619-2017-2(100-106)
- Пальшин Н. И., Здоровеннова Г. Э., Здоровеннов Р. Э., Ефремова Т. В., Гавриленко Г. Г., Тержевик А. Ю. Влияние весенней подледной освещенности и конвективного перемешивания на распределение хлорофилла «а» в малом мезотрофном озере // Водные ресурсы. 2019. Т. 46, № 3. С. 259–269. doi: 10.31857/S0321-0596463259-269

Петров М. П., Терзевик А. Ю., Здорovenнов Р. Э., Здорovenнова Г. Э. Движения воды в мелководном озере, покрытом льдом // Водные ресурсы. 2007. Т. 34, № 2. С. 131–140.

Петров М. П., Терзевик А. Ю., Здорovenнов Р. Э., Здорovenнова Г. Э. Особенности термической структуры мелководного озера в начале зимы // Водные ресурсы. 2006. Т. 33, № 2. С. 154–162.

Петров М. П., Терзевик А. Ю., Пальшин Н. И., Здорovenнов Р. Э., Здорovenнова Г. Э. Поглощение солнечной радиации снежно-ледовым покровом озер // Водные ресурсы. 2005. Т. 32, № 5. С. 546–554.

Радченко И. Г., Ильях Л. В., Шевченко В. П., Здорovenнов Р. Э., Новигатский А. Н., Политова Н. В., Толстиков А. В. Пространственное распределение фитопланктона в субарктическом эстуарии (р. Кемь, Белое море) // Океанология. 2019. Т. 59, № 3. С. 335–346.

Смирнов Е. М., Зайцев Д. К. Метод конечных объемов в приложении к задачам гидрогазодинамики и теплообмена в областях сложной геометрии // Научно-технические ведомости СПбГТУ. 2004. Т. 2(36). С. 70–81.

Терзевик А. Ю., Голосов С. Д., Гавриленко Г. Г., Здорovenнов Р. Э., Здорovenнова Г. Э., Волков С. Ю., Пальшин Н. И., Ефремова Т. В., Богданов С. Р. Возможное влияние «необычной» весны на режим растворенного кислорода в мелководном озере в летний период // Труды Карельского научного центра РАН. 2017. № 10. С. 17–27. doi: 10.17076/lim712

Терзевик А. Ю., Пальшин Н. И., Голосов С. Д., Здорovenнов Р. Э., Здорovenнова Г. Э., Митрохов А. В., Потахин М. С., Шипунова Е. А., Зверев И. С. Гидрофизические аспекты формирования кислородного режима мелководного озера, покрытого льдом // Водные ресурсы. 2010. Т. 37, № 5. С. 568–579.

Bengtsson L., Malm J., Terzhevik A., Petrov M., Bojarinov P., Glinsky A., Palshin N. Field investigation of winter thermo- and hydrodynamics in a small Karelian lake // Limnol. Oceanogr. 1996. Vol. 41, no. 7. P. 1502–1513.

Bogdanov S., Maksimov I., Zdorovennov R., Palshin N., Zdorovennova G., Smirnovsky A., Smirnov S., Efremova T., Terzhevik A. Anisotropic turbulence in the radiatively driven convective layer in a small shallow ice-covered lake: an observational study // Bound.-Layer Meteorol. 2023a. Vol. 187. P. 295–310. doi: 10.1007/s10546-022-00773-y

Bogdanov S., Zdorovennov R., Palshin N., Efremova T., Zdorovennova G. Short standing and propagating internal waves in an ice-covered shallow lake // Water. 2023b. 15(14). P. 2628. doi: 10.3390/w15142628

Bogdanov S. R., Zdorovennov R. E., Palshin N. I., Zdorovennova G. E., Terzhevik A. Yu., Gavrilenko G. G., Volkov S. Yu., Efremova T. V., Kuldin N. A., Kirillin G. B. Deriving of turbulent stresses in a convectively mixed layer in a shallow lake under ice by coupling two ADCPs // Fundam. Appl. Hydrophys. 2021a. Vol. 14(2). P. 17–28. doi: 10.7868/S2073667321020027

Bogdanov S., Zdorovennov R., Palshin N., Zdorovennova G. Deriving six components of Reynolds stress tensor from single-ADCP data // Water. 2021b. Vol. 13. P. 2389. doi: 10.3390/w13172389

Bogdanov S., Zdorovennova G., Volkov S., Zdorovennov R., Palshin N., Efremova T., Terzhevik A.,

Bouffard D. Structure and dynamics of convective mixing in Lake Onego under ice-covered conditions // Inland Waters. 2019. Vol. 9, no. 2. P. 177–192. doi: 10.1080/20442041.2018.1551655

Bouffard D., Zdorovennova G., Bogdanov S., Efremova T., Lavanchy S., Palshin N., Terzhevik A., Love Råman Vinnå, Volkov S., Wüest A., Zdorovennov R., Ulloa H. N. Under-ice convection dynamics in a boreal lake // Inland Waters. 2019. Vol. 9, no. 2. P. 142–161. doi: 10.1080/20442041.2018.1533356

Efremova T., Palshin N., Zdorovennov R. Long-term characteristics of ice phenology in Karelian lakes // Est. J. Earth Sci. 2013. Vol. 62(1). P. 33–41.

Fedorova I., Zdorovennov R., Kadutskiy V., Fedorov G., Shestakova E., Zdorovennova G., Guzeva A., Chernyshova M., Chetverova A., Frolova L., Nigamatzyanova G. Geochemical sensitivity of lacustrine ecosystems of Yamal Peninsula (Russian Arctic) to climate change // EGU General Assembly 2021, online, 19–30 Apr 2021, EGU21-15069. doi: 10.5194/egusphere-egu21-15069, 2021

Filatov N., Johannessen O. M., Pozdnyakov D., Bobylev L. P., Pettersson L. White Sea: its marine environment and ecosystem dynamics influenced by global change. Springer-Verlag London Ltd, 2005. 444 p. doi: 10.1007/3-540-27695-5

Glinsky A. Current meters for measurement of low-speed velocities in ice-covered lakes // Limnol. Oceanogr. 1998. Vol. 43(7). P. 1661–1668.

Golosov S., Maher O. A., Schipunova E., Terzhevik A., Zdorovennova G., Kirillin G. Physical background of the development of oxygen depletion in ice-covered lakes // Oecologia. 2007. Vol. 151. P. 331–340. doi: 10.1007/s00442-006-0543-8

Golosov S., Terzhevik A., Zverev I., Kirillin G., Engelhardt C. Climate change impact on thermal and oxygen regime of shallow lakes // Tellus A. 2012. Vol. 64. Art. 17264. doi: 10.3402/tellusa.v64i0.17264

Golosov S., Zverev I., Shipunova E., Terzhevik A. Modified parameterization of the vertical water temperature profile in the FLake model // Tellus A. 2018. Vol. 70, no. 1. Art. 1441247. doi: 10.1080/16000870.2018.1441247

Kirillin G., Aslamov I., Granin N., Kozlov V., Zdorovennov R. Turbulence in the stratified boundary layer under ice: Observations from Lake Baikal and a new similarity model // Hydrol. Earth Syst. Sci. 2020. Vol. 24, no. 4. P. 1691–1708.

Kirillin G., Engelhardt C., Golosov S., Hintze T. Basin-scale internal waves in the bottom boundary layer of ice-covered Lake Müggelsee, Germany // Aquat. Ecol. 2009. Vol. 43. P. 641–651. doi: 10.1007/s10452-009-9274-3

Kirillin G., Hochschild J., Mironov D., Terzhevik A., Golosov S., Nützmänn G. FLake-Global: Online lake model with worldwide coverage // Environ. Model. Software. 2011. Vol. 26. P. 683–684.

Kirillin G., Leppäranta M., Terzhevik A., Granin N., Bernhardt J., Engelhardt C., Efremova T., Golosov S., Palshin N., Sherstyankin P., Zdorovennova G., Zdorovennov R. Physics of seasonally ice-covered lakes: a review // Aquat. Sci. 2012. Vol. 74. P. 659–682. doi: 10.1007/s00027-012-0279-y

Kirillin G., Terzhevik A. Thermal instability in fresh-water lakes under ice: Effect of salt gradients or solar radiation? // *Cold Reg. Sci. Technol.* 2011. Vol. 65. P. 184–190.

Kouraev A. V., Zakharova E. A., Rémy F., Kostianoy A. G., Shimaraev M. N., Hall N. M. J., Zdorovenov R. E., Suknev A. Ya. Giant ice rings on lakes and field observations of lens-like eddies in the Middle Baikal (2016–2017) // *Limnol. Oceanogr.* 2019. Vol. 64, iss. 6. P. 2738–2754. doi: 10.1002/lno.11338

Malm J., Terzhevik A., Bengtsson L., Boyarinov P., Glinsky A., Palshin N., Petrov M. A field study of thermo- and hydrodynamics in three small Karelian lakes during winter 1994/1995 / Department of Water Resources Engineering. Institute of Technology. University of Lund. 1996. Rep. № 3197. 220 p.

Malm J., Terzhevik A., Bengtsson L., Boyarinov P., Glinsky A., Palshin N., Petrov M. A field study on currents in a shallow ice-covered lake // *Limnol. Oceanogr.* 1998. Vol. 43. P. 1669–1679.

Mironov D., Terzhevik A., Kirillin G., Jonas T., Malm J., Farmer D. Radiatively-driven convection in ice-covered lakes: observations, scaling and a mixed-layer model // *J. Geophys. Res.* 2002. Vol. 107, iss. C4. P. 7-1–7-16. doi: 10.1029/2001JC000892

Mironov D., Heise E., Kourzeneva E., Ritter B., Schneider N., Terzhevik A. Implementation of the lake parameterisation scheme FLake into the numerical weather prediction model COSMO // *Boreal Env. Res.* 2010. Vol. 15. P. 218–230.

Palshin N. I., Bogdanov S. R., Zdorovenova G. E., Zdorovenov R. E., Efremova T. V., Belashev B. Z., Terzhevik A. Yu. Short internal waves in a small ice-covered lake // *Water Resources.* 2018. Vol. 45, no. 5. P. 695–705. doi: 10.1134/S0097807818050159

Smirnov S., Smirnovsky A., Zdorovenova G., Zdorovenov R., Palshin N., Novikova I., Terzhevik A., Bogdanov S. Water temperature evolution driven by solar radiation in an ice-covered lake: A numerical study and observational data // *Water.* 2022. Vol. 14(24). P. 4078. doi: 10.3390/w14244078

Terzhevik A., Golosov S., Palshin N., Mitrokhov A., Zdorovenov R., Zdorovenova G., Kirillin G., Shipunova E., Zverev I. Some features of the thermal and dissolved oxygen structure in boreal, shallow ice-covered Lake Vendyurskoe, Russia // *Aquat. Ecol.* 2009. Vol. 43. P. 617–627. doi: 10.1007/s10452-009-9288-x

Volkov S. Yu., Bogdanov S. R., Zdorovenov R. E., Palshin N. I., Zdorovenova G. E., Efremova T. V., Gavrilenko G. G., Terzhevik A. Yu. Resonance generation of short internal waves by the barotropic seiches in an ice-covered shallow lake // *Physical Oceanography.* 2020. Vol. 27, iss. 4. P. 407–422. doi: 10.22449/0233-7584-2020-4-407-423

Volkov S., Bogdanov S., Zdorovenov R., Zdorovenova G., Terzhevik A., Palshin N., Bouffard D., Kirillin G. Fine scale structure of convective mixed layer in ice-covered lake // *Environ. Fluid Mech.* 2018. Vol. 19, no. 3. P. 751–764. doi: 10.1007/s10652-018-9652-2

Weyhenmeyer G. A., Obertegger U., Rudebeck H., Jakobsson E., Jansen J., Zdorovenova G., Bansal S., Block B. D., Carey C. C., Doubek J. P., Dugan H., Erina O., Fedorova I., Fischer J. M., Grinberga L.,

Grossart H. P., Kangur K., Knoll L. B., Laas A., Lepori F., Meier J., Palshin N., Peternell M., Pulkkanen M., Rusak J. A., Sharma S., Wain D., Zdorovenov R. Towards critical white ice conditions in lakes under global warming // *Nat. Commun.* 2022. Vol. 13. Art. 4974. doi: 10.1038/s41467-022-32633-1

Woolway R. I., Merchant C. J. Worldwide alteration of lake mixing regimes in response to climate change // *Nat. Geosci.* 2019. Vol. 12. P. 271–276. doi: 10.1038/s41561-019-0322-x

Zdorovenova G., Palshin N., Efremova T., Zdorovenov R., Gavrilenko G., Volkov S., Bogdanov S., Terzhevik A. Albedo of a small ice-covered boreal lake: Daily, meso-scale and interannual variability on the background of regional climate // *Geosciences.* 2018. Vol. 8. Art. 206. doi: 10.3390/geosciences8060206

Zdorovenova G., Palshin N., Golosov S., Efremova T., Belashev B., Bogdanov S., Fedorova I., Zverev I., Zdorovenov R., Terzhevik A. Dissolved oxygen in a shallow ice-covered lake in winter: Effect of changes in light, thermal and ice regimes // *Water.* 2021. Vol. 13(17). Art. 2435. doi: 10.3390/w13172435

Zdorovenov R. E., Gavrilenko G. G., Zdorovenova G. E., Palshin N. I., Efremova T. V., Golosov S. D., Terzhevik A. Yu. Optical properties of Lake Vendyurskoe // *Geography, Environment, Sustainability.* 2016. Vol. 9, no. 3. P. 74–87.

Zdorovenov R., Golosov S., Zverev I., Zdorovenova G., Fedorova I. Arctic climate variability and ice regime of the Lena River delta lakes // *E3S Web of Conferences.* 2020. Vol. 163. Art. 04008. doi: 10.1051/e3sconf/202016304008

Zdorovenov R., Palshin N., Zdorovenova G., Efremova T., Terzhevik A. Interannual variability of ice and snow cover of a small shallow lake // *Est. J. Earth Sci.* 2013. Vol. 62. P. 26–32. doi: 10.3176/earth.2013.03

References

Bengtsson L., Malm J., Terzhevik A., Petrov M., Boyarinov P., Glinsky A., Palshin N. Field investigation of winter thermo- and hydrodynamics in a small Karelian lake. *Limnol. Oceanogr.* 1996;41(7):1502–1513.

Bogdanov S., Maksimov I., Zdorovenov R., Palshin N., Zdorovenova G., Smirnovsky A., Smirnov S., Efremova T., Terzhevik A. Anisotropic turbulence in the radiatively driven convective layer in a small shallow ice-covered lake: an observational study. *Bound.-Layer Meteorol.* 2023;187:295–310. doi: 10.1007/s10546-022-00773-y

Bogdanov S., Zdorovenova G., Volkov S., Zdorovenov R., Palshin N., Efremova T., Terzhevik A., Bouffard D. Structure and dynamics of convective mixing in Lake Onego under ice-covered conditions. *Inland Waters.* 2019;9(2):177–192. doi: 10.1080/20442041.2018.1551655

Bogdanov S. R., Zdorovenov R. E., Palshin N. I., Zdorovenova G. E., Terzhevik A. Yu., Gavrilenko G. G., Volkov S. Yu., Efremova T. V., Kuldin N. A., Kirillin G. B. Deriving of turbulent stresses in a convectively mixed layer in a shallow lake under ice by coupling two ADCPs.

Fundam. Appl. Hydrophys. 2021;14(2):17–28. doi: 10.7868/S2073667321020027

Bogdanov S., Zdorovennov R., Palshin N., Efremova T., Zdorovennova G. Short standing and propagating internal waves in an ice-covered shallow lake. *Water*. 2023;15(14):2628. doi: 10.3390/w15142628

Bogdanov S., Zdorovennov R., Palshin N., Zdorovennova G. Deriving six components of Reynolds stress tensor from single-ADCP data. *Water*. 2021;13:2389. doi: 10.3390/w13172389

Boyarinov P. M., Efremova T. V., Pal'shin N. I., Petrov M. P., Filatov N. N. Thermal conditions and dynamics of lake waters. *Onezhskoe ozero. Ekologicheskie problemy = Lake Onego. Environmental issues*. Petrozavodsk: KarRC RAS; 1999. P. 22–48. (In Russ.)

Boyarinov P. M., Petrov M. P. Processes of thermal regime formation in deep freshwater reservoirs. *Leninograd: Nauka*; 1991. 174 p. (In Russ.)

Bouffard D., Zdorovennova G., Bogdanov S., Efremova T., Lavanchy S., Palshin N., Terzhevik A., Love Råman Vinnå, Volkov S., Wüest A., Zdorovennov R., Ulloa H. N. Under-ice convection dynamics in a boreal lake. *Inland Waters*. 2019;9(2):142–161. doi: 10.1080/20442041.2018.1533356

Dolotov Yu. S., Filatov N. N., Petrov M. P., Tolstikov A. V., Zdorovennov R. E., Platonov A. V., Shevchenko V. P., Filippov A. S., Bushuev K. L., Kutcheva I. P., Denisenko N. V., Stein R., Saukel C. Multidisciplinary studies in Onega Bay of the White Sea and the estuary of the Onegariver during the summer period. *Oceanology*. 2008;48(2):255–267.

Dolotov Yu. S., Filatov N. N., Shevchenko V. P., Nemova N. N., Rimskii-Korsakov N. A., Denisenko N. V., Kutcheva I. P., Boyarinov P. M., Petrov M. P., Lifshitz V. Kh., Platonov A. V., Demina L. L., Kukharev V. I., Kovalenko V. N., Zdorovennov R. E., Rat'kova T. N., Sergeeva O. M., Novigatskii A. N., Pautova L. A., Filipieva K. V., Nothig E.-M., Loronzen C. Monitoring tidal conditions in estuaries of the Karelian coast of the White Sea. *Water Resources*. 2005;32(6):611–628.

Efremova T. V., Pal'shin N. I., Belashev B. Z. Water temperature of lakes of different types in Karelia under conditions of climate change (according to the instrumental measurements in 1953–2011). *Vodnye resursy = Water Resources*. 2016;43(2):228–238. doi: 10.7868/S0321059616020024 (In Russ.)

Efremova T. V., Pal'shin N. I., Zdorovennova G. E., Terzhevik A. Yu. The effects of the extremely hot summer of 2010 on water temperature and oxygen distribution in lakes of Karelia. *Meteorologiya i gidrologiya = Meteorology and Hydrology*. 2015;9:67–75. (In Russ.)

Efremova T., Palshin N., Zdorovennov R. Long-term characteristics of ice phenology in Karelian lakes. *Est. J. Earth Sci.* 2013;62(1):33–41.

Fedorova I., Zdorovennov R., Kadutskiy V., Fedorov G., Shestakova E., Zdorovennova G., Guzeva A., Chernyshova M., Chetverova A., Frolova L., Nigmatzyanova G. Geochemical sensitivity of lacustrine ecosystems of the Yamal Peninsula (Russian Arctic) to climate change. *EGU General Assembly 2021, online, 19–30 Apr 2021, EGU21-15069*. doi: 10.5194/egusphere-egu21-15069, 2021

Filatov N. N. (ed.). *Lake Onego. Atlas*. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2010. 151 p. (In Russ.)

Filatov N., Johannessen O. M., Pozdnyakov D., Bobylev L. P., Pettersson L. *White Sea: its marine environment and ecosystem dynamics influenced by global change*. Springer-Verlag London Ltd; 2005. 444 p. doi: 10.1007/3-540-27695-5

Filatov N. N., Kukharev V. I. (eds.). *Lakes of Karelia. A reference book*. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2013. 464 p. (In Russ.)

Filatov N. N., Terzhevik A. Yu. (eds.). *The White Sea and its catchment under the impact of climatic and anthropogenic factors*. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2007. 335 p. (In Russ.)

Gavrilenko G. G., Zdorovennova G. E., Zdorovennov R. E., Pal'shin N. I., Mitrokhov A. V., Terzhevik A. Yu. Heat flux at the water-sediment interface in a shallow lake. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2015;9:3–9. doi: 10.17076/lim72 (In Russ.)

Glinsky A. Current meters for measurement of low-speed velocities in ice-covered lakes. *Limnol. Oceanogr.* 1998;43(7):1661–1668.

Golosov S., Maher O. A., Schipunova E., Terzhevik A., Zdorovennova G., Kirillin G. Physical background of the development of oxygen depletion in ice-covered lakes. *Oecologia*. 2007;151:331–340. doi: 10.1007/s00442-006-0543-8

Golosov S., Terzhevik A., Zverev I., Kirillin G., Engelhardt C. Climate change impact on thermal and oxygen regime of shallow lakes. *Tellus A*. 2012;64:17264. doi: 10.3402/tellusa.v64i0.17264

Golosov S. D., Zverev I. S., Terzhevik A. Yu. Vertical thermal structure and heat exchange in ice covered lake. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2017;3:13–20. doi: 10.17076/lim464 (In Russ.)

Golosov S., Zverev I., Shipunova E., Terzhevik A. Modified parameterization of the vertical water temperature profile in the FLake model. *Tellus A*. 2018;70(1):1441247. doi: 10.1080/16000870.2018.1441247

Ibraev R. A. *Mathematical modeling of thermohydrodynamic processes in the Caspian Sea*. Moscow: Geos; 2008. 127 p. (In Russ.)

Kirillin G., Aslamov I., Granin N., Kozlov V., Zdorovennov R. Turbulence in the stratified boundary layer under ice: Observations from Lake Baikal and a new similarity model. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2020;24(4):1691–1708.

Kirillin G., Engelhardt C., Golosov S., Hintze T. Basin-scale internal waves in the bottom boundary layer of ice-covered Lake Müggelsee, Germany. *Aquat. Ecol.* 2009;43:641–651. doi: 10.1007/s10452-009-9274-3

Kirillin G., Hochschild J., Mironov D., Terzhevik A., Golosov S., Nützmänn G. FLake-Global: Online lake model with worldwide coverage. *Environ. Model. Software*. 2011;26:683–684.

Kirillin G., Leppäranta M., Terzhevik A., Granin N., Bernhardt J., Engelhardt C., Efremova T., Golosov S., Palshin N., Sherstyankin P., Zdorovennova G., Zdorovennov R. Physics of seasonally ice-covered lakes: a review. *Aquat. Sci.* 2012;74:659–682. doi: 10.1007/s00027-012-0279-y

Kirillin G., Terzhevik A. Thermal instability in freshwater lakes under ice: Effect of salt gradients or solar radiation? *Cold Reg. Sci. Technol.* 2011;65:184–190.

Kouraev A. V., Zakharova E. A., Rémy F., Kostianoy A. G., Shimaraev M. N., Hall N. M. J., Zdorovenov R. E., Suknev A. Ya. Giant ice rings on lakes and field observations of lens-like eddies in the Middle Baikal (2016–2017). *Limnol. Oceanogr.* 2019;64(6):2738–2754. doi: 10.1002/lno.11338

Malm J., Terzhevik A., Bengtsson L., Boyarinov P., Glinsky A., Palshin N., Petrov M. A field study of thermo- and hydrodynamics in three small Karelian lakes during winter 1994/1995. Department of Water Resources Engineering. Institute of Technology. University of Lund. 1996. Rep. № 3197. 220 p.

Malm J., Terzhevik A., Bengtsson L., Boyarinov P., Glinsky A., Palshin N., Petrov M. A field study on currents in a shallow ice-covered lake. *Limnol. Oceanogr.* 1998;43:1669–1679.

Mironov D., Heise E., Kourzeneva E., Ritter B., Schneider N., Terzhevik A. Implementation of the lake parameterisation scheme FLake into the numerical weather prediction model COSMO. *Boreal Env. Res.* 2010;15:218–230

Mironov D., Terzhevik A., Kirillin G., Jonas T., Malm J., Farmer D. Radiatively-driven convection in ice-covered lakes: observations, scaling and a mixed-layer model. *J. Geophys. Res.* 2002;107(C4):7-1–7-16. doi: 10.1029/2001JC000892

Mitrokhov A. V., Pal'shin N. I. An autonomous device for measuring the temperature profile in the bottom layers of water and soil. Utility model patent RU 153787 U1, 27.07.2015. Application No. 2014146400/28 dated 18.11.2014. (In Russ.)

Palshin N. I., Bogdanov S. R., Zdorovenova G. E., Zdorovenov R. E., Efremova T. V., Belashev B. Z., Terzhevik A. Yu. Short internal waves in a small ice-covered lake. *Water Resources.* 2018;45(5):695–705. doi: 10.1134/S0097807818050159

Pal'shin N. I., Efremova T. V. Thermal structure of lakes in the North-West of Russia during the ice period. *Geografiya i prirodnye resursy = Geography and Natural Resources.* 2017;2:100–106. doi: 10.21782/GIPR0206-1619-2017-2(100-106) (In Russ.)

Pal'shin N. I. Thermal and hydrodynamic processes in lakes during the ice period. Petrozavodsk: KarRC RAS; 1999. 86 p. (In Russ.)

Pal'shin N. I., Zdorovenova G. E., Zdorovenov R. E., Efremova T. V., Gavrilenko G. G., Terzhevik A. Yu. Influence of spring under-ice illumination and convective mixing on the distribution of chlorophyll 'a' in a small mesotrophic lake. *Vodnye resursy = Water Resources.* 2019;46(3):259–269. doi: 10.31857/S0321-0596463259-269 (In Russ.)

Petrov M. P., Terzhevik A. Yu., Pal'shin N. I., Zdorovenov R. E., Zdorovenova G. E. Absorption of solar radiation by the snow-ice cover of lakes. *Vodnye resursy = Water Resources.* 2005;32(5):546–554. (In Russ.)

Petrov M. P., Terzhevik A. Yu., Zdorovenov R. E., Zdorovenova G. E. Features of the thermal structure of a shallow lake at the beginning of winter. *Vodnye resursy = Water Resources.* 2006;33(2):154–162. (In Russ.)

Petrov M. P., Terzhevik A. Yu., Zdorovenov R. E., Zdorovenova G. E. Movements of water in a shallow lake covered with ice. *Vodnye resursy = Water Resources.* 2007;34(2):131–140. (In Russ.)

Radchenko I. G., Ilyash L. V., Shevchenko V. P., Novigatsky A. N., Politova N. V., Zdorovenov R. E., Tolstikov A. V. Spatial distribution of phytoplankton in the subarctic estuary (Kem River, The White sea). *Oceanology.* 2019;59(3):305–315.

Smirnov S., Smirnovsky A., Zdorovenova G., Zdorovenov R., Palshin N., Novikova I., Terzhevik A., Bogdanov S. Water temperature evolution driven by solar radiation in an ice-covered lake: A numerical study and observational data. *Water.* 2022;14(24):4078. doi: 10.3390/w14244078

Smirnov E. M., Zaitsev D. K. Finite volume method as applied to hydro- and gas dynamics and heat transfer problems in complex geometry domains. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGTU = St. Petersburg State Polytechnical University Journal.* 2004;2(36):70–81. (In Russ.)

Terzhevik A. Yu., Golosov S. D., Gavrilenko G. G., Zdorovenov R. E., Zdorovenova G. E., Volkov S. Yu., Pal'shin N. I., Efremova T. V., Bogdanov S. R. The possible effect of an unusual spring on the dissolved oxygen in a shallow lake during the summer. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS.* 2017;10:17–27. doi: 10.17076/lim712 (In Russ.)

Terzhevik A., Golosov S., Palshin N., Mitrokhov A., Zdorovenov R., Zdorovenova G., Kirillin G., Shipunova E., Zverev I. Some features of the thermal and dissolved oxygen structure in boreal, shallow ice-covered Lake Vendyurskoe, Russia. *Aquat. Ecol.* 2009;43:617–627. doi: 10.1007/s10452-009-9288-x

Terzhevik A. Yu., Pal'shin N. I., Golosov S. D., Zdorovenov R. E., Zdorovenova G. E., Mitrokhov A. V., Potahin M. S., Shipunova E. A., Zverev I. S. Hydrophysical aspects of the formation of the oxygen regime of an ice-covered shallow lake. *Vodnye resursy = Water Resources.* 2010;37(5):568–579. (In Russ.)

Volkov S. Yu., Bogdanov S. R., Zdorovenov R. E., Palshin N. I., Zdorovenova G. E., Efremova T. V., Gavrilenko G. G., Terzhevik A. Yu. Resonance generation of short internal waves by the barotropic seiches in an ice-covered shallow lake. *Physical Oceanography.* 2020;27(4):407–422. doi: 10.22449/0233-7584-2020-4-407-423

Volkov S., Bogdanov S., Zdorovenov R., Zdorovenova G., Terzhevik A., Palshin N., Bouffard D., Kirillin G. Fine scale structure of convective mixed layer in ice-covered lake. *Environ. Fluid Mech.* 2018;19(3):751–764. doi: 10.1007/s10652-018-9652-2

Volkov S. Yu., Bogdanov S. R., Zdorovenov R. E., Zdorovenova G. E., Pal'shin N. I., Terzhevik A. Yu. Large-scale structure of a convective mixed layer in an ice-covered shallow lake. *Fundamental'naya i prikladnaya gidrofizika = Fundamental and Applied Hydrophysics.* 2019;12(1):30–39. doi: 10.7868/S2073667319010040 (In Russ.)

Weyhenmeyer G. A., Obertegger U., Rudebeck H. Jakobsson E., Jansen J., Zdorovenova G., Bansal S., Block B. D., Carey C. C., Doubek J. P., Dugan H.,

Erina O., Fedorova I., Fischer J. M., Grinberga L., Grossart H. P., Kangur K., Knoll L. B., Laas A., Lepori F., Meier J., Palshin N., Peterzell M., Pulkkanen M., Rusak J. A., Sharma S., Wain D., Zdorovenov R. Towards critical white ice conditions in lakes under global warming. *Nat. Commun.* 2022;13:4974. doi: 10.1038/s41467-022-32633-1

Woolway R. I., Merchant C. J. Worldwide alteration of lake mixing regimes in response to climate change. *Nat. Geosci.* 2019;12:271–276. doi: 10.1038/s41561-019-0322-x

Zdorovenova G., Palshin N., Efremova T., Zdorovenov R., Gavrilenko G., Volkov S., Bogdanov S., Terzhevik A. Albedo of a small ice-covered boreal lake: Daily, meso-scale and interannual variability on the background of regional climate. *Geosciences*. 2018;8:206. doi: 10.3390/geosciences8060206

Zdorovenova G., Palshin N., Golosov S., Efremova T., Belashev B., Bogdanov S., Fedorova I., Zverev I., Zdorovenov R., Terzhevik A. Dissolved oxygen in a shallow ice-covered lake in winter: Effect of changes in light, thermal and ice regimes. *Water*. 2021;13(17):2435. doi: 10.3390/w13172435

Zdorovenova G. E., Shadrina A. A., Fedorova I. V. Modeling the thermal regime of small Arctic lakes. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya = Advances in Current Natural Sciences*. 2016;1:111–115. (In Russ.)

Zdorovenov R. E., Efremova T. V., Pal'shin N. I., Zdorovenova G. E. The role of thermohydrophysical

processes in the distribution of chlorophyll 'a' in the water column of a small mesotrophic lake. *Izvestiya RGO = Izvestia RGO*. 2021;3:47–62. doi: 10.31857/S0869607121030083 (In Russ.)

Zdorovenov R. E., Gavrilenko G. G., Zdorovenova G. E., Palshin N. I., Efremova T. V., Golosov S. D., Terzhevik A. Yu. Optical properties of Lake Vendyurskoe. *Geography, Environment, Sustainability*. 2016;9(3):74–87.

Zdorovenov R., Golosov S., Zverev I., Zdorovenova G., Fedorova I. Arctic climate variability and ice regime of the Lena River delta lakes. *E3S Web of Conferences*. 2020;163:04008. doi: 10.1051/e3sconf/202016304008

Zdorovenov R., Palshin N., Zdorovenova G., Efremova T., Terzhevik A. Interannual variability of ice and snow cover of a small shallow lake. *Est. J. Earth Sci.* 2013;62:26–32. doi: 10.3176/earth.2013.03

Zdorovenov R. E., Zdorovenova G. E., Pal'shin N. I., Terzhevik A. Yu. Variability of thermal and oxygen regimes of a shallow lake in winter. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2011;4:57–63. (In Russ.)

Zverev I. S., Zdorovenov R. E., Zdorovenova G. E., Pal'shin N. I., Bogdanov S. R., Gavrilenko G. G., Volkov S. Yu., Efremova T. V., Golosov S. D., Terzhevik A. Yu. Response of a shallow lake to wind load during open water period (according to numerical experiments on 3D model). *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2020;9:5–17. doi: 10.17076/lim1297 (In Russ.)

Поступила в редакцию / received: 11.09.2023; принята к публикации / accepted: 02.10.2023.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Терзhevik Аркадий Юрьевич

канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник

Пальшин Николай Иннокентьевич

канд. геогр. наук, старший научный сотрудник

e-mail: npalshin@mail.ru

Ефремова Татьяна Владимировна

канд. геогр. наук, старший научный сотрудник

e-mail: efremova@nwpi.krc.karelia.ru

Богданов Сергей Рэмович

докт. физ.-мат. наук, доцент, ведущий научный сотрудник

e-mail: Sergey.R.Bogdanov@mail.ru

Голосов Сергей Дмитриевич

канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник

e-mail: sergey_golosov@mail.ru

Зверев Илья Сергеевич

канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник

e-mail: iliazverev@mail.ru

Волков Сергей Юрьевич

младший научный сотрудник

e-mail: TARANARMO@gmail.com

CONTRIBUTORS:

Terzhevik, Arkady

Cand. Sci. (Tech.), Leading Researcher

Palshin, Nikolai

Cand. Sci. (Geogr.), Senior Researcher

Efremova, Tatyana

Cand. Sci. (Geogr.), Senior Researcher

Bogdanov, Sergey

Dr. Sci. (Phys.-Math.), Assoc. Prof., Leading Researcher

Golosov, Sergey

Cand. Sci. (Phys.-Math.), Senior Researcher

Zverev, Iliia

Cand. Sci. (Phys.-Math.), Senior Researcher

Volkov, Sergey

Junior Researcher

Митрохов Андрей Васильевич

главный гидролог

e-mail: a.mitrokhov@list.ru

Смирнов Сергей Игоревич

канд. физ.-мат. наук, научный сотрудник

e-mail: sergeysmirnov92@mail.ru

Здоровеннов Роман Эдуардович

канд. геогр. наук, старший научный сотрудник

e-mail: romga74@gmail.com

Здоровеннова Галина Эдуардовна

канд. геогр. наук, старший научный сотрудник,
руководитель лаборатории гидрофизики

e-mail: zdorovennova@gmail.com

Mitrokhov, Andrey

Chief Hydrologist

Smirnov, Sergey

Cand. Sci. (Phys.-Math.), Senior Researcher

Zdorovennov, Roman

Cand. Sci. (Geogr.), Senior Researcher

Zdorovennova, Galina

Cand. Sci. (Geogr.), Senior Researcher, Head of
Hydrophysics Laboratory